

ジョイスティックを用いた遠隔操作型 移動マニピュレータの微操作の実現

Development of a teleoperation system for fine operation of mobile manipulators with joystick operation

○ 西村 和真 (東北大) 幸村 貴臣 (東北大)
桐林 星河 (東北大) 正 永谷 圭司 (東北大)

Kazuma NISHIMURA, Tohoku University, nishimura@mech.tohoku.ac.jp
Takaomi KOUMURA, Tohoku University
Seiga KIRIBAYASHI, Tohoku University
Keiji NAGATANI, Tohoku University

In disaster environments, rescue robots have been expected for searching victims and exploring target environments. In order to extend their capabilities in such searching missions, we developed a 6 degree of freedom manipulator that mounted on our tracked vehicle, Quince. A master-slave system was adopted for intuitive teleoperation of the slave manipulator. However, we had a difficulty to enable fine operation of the slave manipulator, because of a limitation of fine operability of the master manipulator. Therefore, in this research, we constructed a velocity control system for the position of the hand based on input signal via joystick to improve its operability. In this paper, we introduce the velocity control system of the manipulator with a joystick, and report basic experiments to evaluate the method.

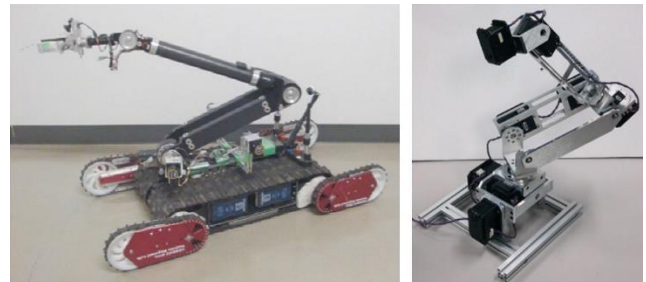
Key Words: Mobile Manipulator, Teleoperation, Master-Slave, Joystick, Manipulability

1. 緒言

強い放射線にさらされた原子炉内部や災害現場など人が立ち入ることができない環境下において、無人探査による情報収集や復旧作業などの必要性は高い。そこで、これまで、移動ロボットに搭載したマニピュレータを遠隔操作することで上述の作業を可能とする、移動マニピュレータに関する研究が数多く行われてきた[1][2]。本研究でも、これまで、被災地探査における小物体の移動や被災者への救援物資・通信機器の供給を目指した、不整地移動マニピュレータシステムの研究開発を行ってきた[3]。図 1(a)は、当研究室で研究開発を進めている、不整地移動マニピュレータ Quince である。また、このマニピュレータの遠隔操作を行うため、これまで、ロボットに搭載したマニピュレータ (スレーブアーム) と同形状のマスタアームを開発し (図 1(b)参照)、人間にとって直感的な操作を可能とするマスタスレーブ方式の遠隔操作システムを実装した。これにより、本研究が対象とする、災害現場における狭小空間での作業において、高い操作性を有することが期待できる [4][5]。

一方で、同形状型マスタスレーブ方式の遠隔操作において、微操作の実行が困難であるという問題が生じた。特に、物体の把持を正確に行うため、把持直前には、手先の微操作が要求される。しかしながら、マスタアーム全体を操作しつつ、手先の微妙な操作を行うには熟練を要するため、把持作業可否は、操作者の熟練度に大きく依存することが分かってきた。

そこで本研究では、微操作を行う際に、ジョイスティックによる速度指令方式を採用することとした。この方式は、ジョイスティックを用いて、スレーブアームの手先の並進移動速度や回転速度を直接指定するものであり、オペレータがマスタアームを動かさずに、微操作を行うことができるという利点を持つ。



(a) Rescue robot "Quince" (b) Master arm
Fig. 1 Master-slave control system for Quince

本稿では、マスタスレーブ方式と併用して利用が可能な、ジョイスティックを用いたスレーブアームの微操作システムの実装の紹介ならびに、提案システムの基本評価試験について報告する。

2. マスタスレーブ方式との併用を考慮したジョイスティックによるスレーブアームの微操作システム

2.1 マスタスレーブ方式における微操作の問題点

移動マニピュレータによる遠隔操作マニピュレーションの例として物体の把持・移動を考える。図 2 に示すように、ある位置に置かれている物体を把持し、持ち上げるといった一連の動作は、以下に示す 4 段階に区分できる。

- 物体付近に移動ロボットを接近する。
- スレーブアームの手先を物体にアプローチする。
- スレーブアーム先端のハンドで物体を把持する。
- スレーブアームを制御し物体を目的位置まで移動する。

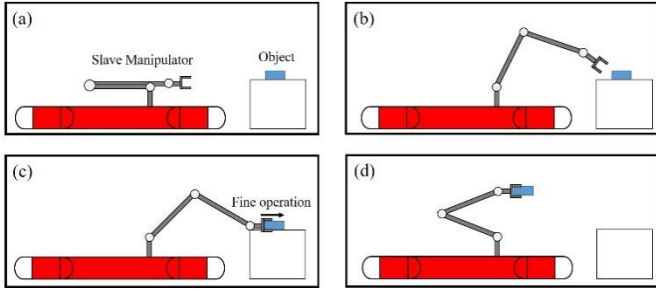


Fig. 2 An approach using master-arm and joystick

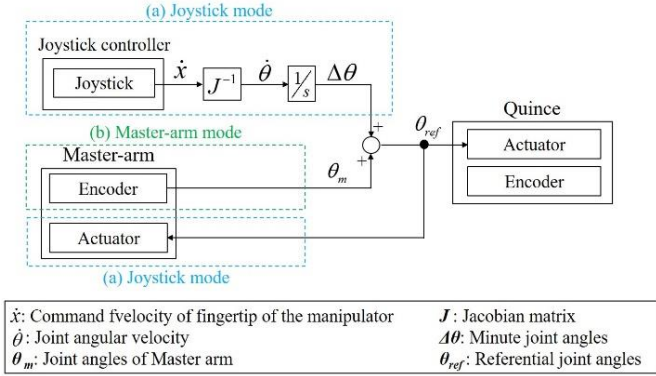


Fig. 3 Block diagram of the control system: (a) joystick mode, and (b) master-slave mode

マスタスレーブ方式を用いた場合、(b)のアプローチについては、直感的な操作が可能であるため、この動作の実現は容易となる。しかしながら、(b)から(c)に向かう段階では、物体を正確に把持するため、手先位置・姿勢の微操作を行う必要があり、この動作の成功の可否は、操作者の熟練度合に依存する。

以上に示す通り、一連の作業の中で、マスタスレーブ方式による操作が有利な部分と不利な部分が存在する。そこで、本研究では、マスタスレーブ方式で遠隔操作を行いつつ、スレーブアームの微操作が必要な場合に応じて、ジョイスティックを用いた手先の速度指令を実現する方式を採用し、把持動作における作業性能を向上させることとした。

2.2 提案手法による遠隔操作アプローチ

本研究では、マスタスレーブ方式とジョイスティックを用いた手先の速度指令方式を併用するため、図 3 に示す制御系を構築した。

(a)ジョイスティックモードでは、手先の並進/回転速度が、ジョイスティックを用いて指定される。この指令速度から、ヤコビの逆行列を用いて目標関節角速度を算出し、これをスレーブアームの目標関節角速度とすることで、微操作を実現する。また、スレーブアームの各関節角度は、マスタアームの各関節角の指令値としてフィードバックされる。

(b)マスタスレーブモードの場合、マスタアームの各関節は制御を行わず、各関節部のモータの関節角をスレーブアームに与えることにより、遠隔操作を行う。なお、スレーブアームがマスタアームの形状となるまでには、時間遅れが生ずる

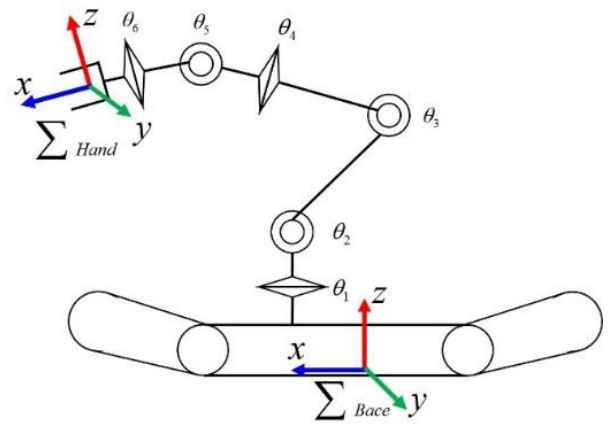


Fig. 4 Definition of the local coordinate on Quince.

ため、マスタスレーブモードからジョイスティックモードへの切り替えの際には、注意が必要である。

以上のように、操作モードを切り替えることにより、作業段階に応じたスレーブアームの遠隔操作が可能となり、操作性が向上することが期待できる。

2.3 ジョイスティックを用いた手先の速度指令方式の実装

ジョイスティックを用いた手先の速度指令方式では、ジョイスティックに割り当てた各軸の傾きに応じて、手先速度の方向や大きさを決定する。

図 4 に示すように移動マニピュレータの手先座標系、ベース座標系、ならびに関節角を定義する。まず、マニピュレータの手先速度 \dot{x} と関節角速度 $\dot{\theta}$ の関係は、ヤコビ行列 J を用いて、次式のように表される。

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{x} \quad (1)$$

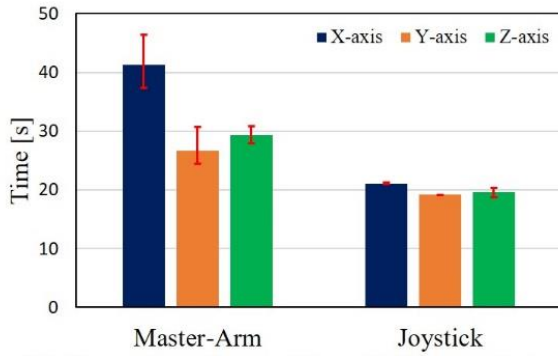
上式を用いて、マニピュレータの手先速度に対応した関節角速度が算出可能となるため、これをスレーブアームの各関節部のモータに与えることで微操作が可能となる。

また、本システムでは、手先速度を指令値として入力する際、ベース座標系における速度指令と、手先座標系における速度指令の切り替えを可能とすることとした。手先座標系を選択した場合、操作者は、スレーブアームの手先に搭載されているカメラ映像に基づき手先操作が行うことが可能である。これにより、操作者は、違和感なくスレーブアームの遠隔操作が行える。

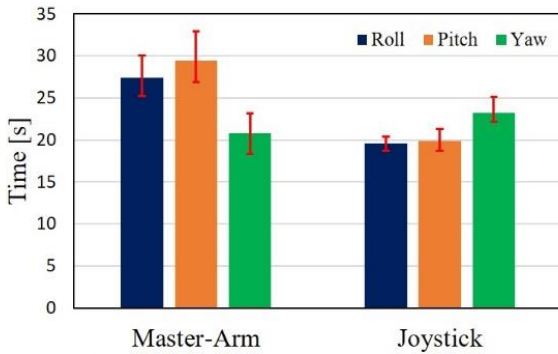
一方、ベース座標系における速度指令では、ベース座標を基準にして指令値を入力するため、例えば、地面に平行な手先の移動などが実現可能となる。手先座標系における指令手先速度 \dot{x}_{Hand} と、ベース座標系における指令手先速度 \dot{x} の関係は、次式で表せる。

$$\dot{x} = {}^{Base}R_{Hand} \dot{x}_{Hand} \quad (2)$$

$${}^{Base}T_{Hand} = \begin{bmatrix} {}^{Base}R_{Hand} & {}^{Base}d_{Hand} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



(a) Operation time of translation motion



(b) Operation time of rotation motion

Fig. 5 Experimental result of operation time.

ここで、 ${}^{Base}R_{Hand}$ は、(3)式に表されるベース座標系から手先座標系への同次変換行列 ${}^{Base}T_{Hand}$ における手先の姿勢を表す行列であり、 ${}^{Base}d_{Hand}$ はベース座標系における手先位置である。この式を利用することで、ベース座標系における速度指令が実現可能となる。

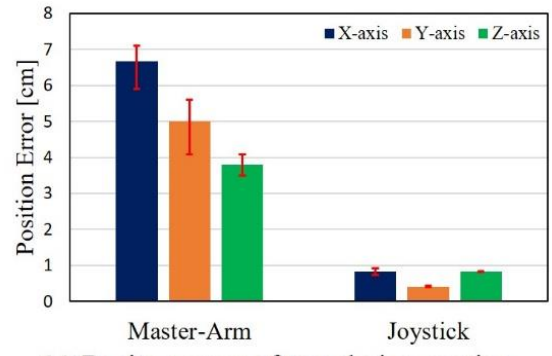
3. システムの評価試験

3.1 微操作性の定量的評価

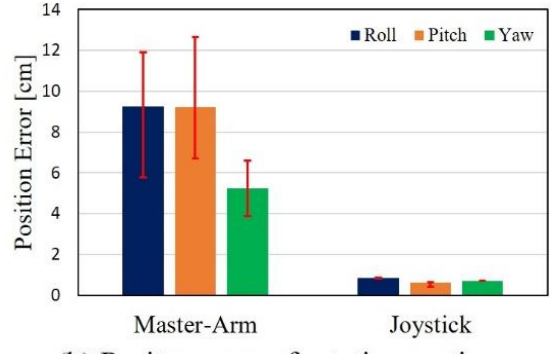
構築したシステムの有用性を検証することを目的として、ジョイスティックを用いた速度指令方式によるスレーブアームの微操作性の評価を行った。

対象とする動作は、手先の微小並進動作及び微小回転動作である。まず、スレーブアームの初期姿勢は、初期関節角度： $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)=(0,90,-90,0,90,0)$ [deg]、初期手先位置： $(x, y, z)=(85,0,45)$ [cm]と設定する。並進動作については、 x 軸、 y 軸、 z 軸の各軸方向に対して、独立に、初期位置から ± 20 [cm]の範囲で往復動作を行うこととした。また、回転動作については、 x 軸、 y 軸、 z 軸の各軸周りに対して、独立に、初期姿勢から ± 30 [deg]の範囲で手先を中心とした回転動作を行うこととした。なお、速度指令の与え方については、ベース座標系における速度指令で与えることとした。

上述の動作を被験者 3 人に対して実行してもらい、作業時間及び位置誤差に対する比較を行った。動作時間の結果を図 5 に、位置誤差の結果を図 6 に示す。なお、手先の並進動作における位置誤差は、動作方向軸以外の偏差の最大値、手先回転動作における誤差は、動作回転軸以外の回転偏差の最大値



(a) Position error of translation motion



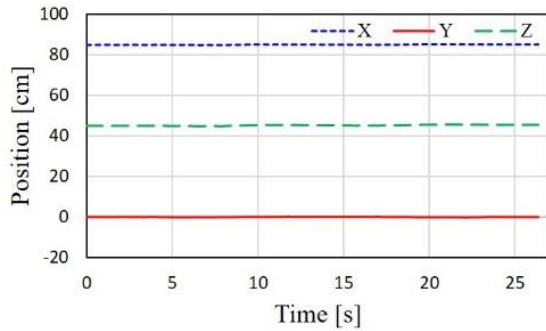
(b) Position error of rotation motion

Fig. 6 Experimental result of position error.

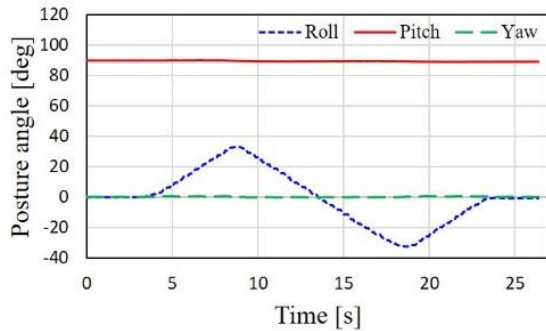
とした。図 5 より、ジョイスティックを用いた速度指令方式の場合の作業時間は、並進動作で最長 21[s]、回転動作で最長 25[s]となった。一方、マスタアーム方式を用いた場合は、並進動作が最長 45[s]、回転動作が最長 33[s]となり、ジョイスティックを用いた速度指令方式よりも作業時間が長くなった。また、作業時間のばらつきに着目すると、マスタアーム方式を用いた操作の場合、操作者の熟練度に依存し、ばらつきが大きくなっている。これに対し、ジョイスティックを用いた速度指令方式の場合には、操作者の熟練度に依存せず、ばらつきは小さいという結果となった。次に、位置誤差に関する結果比較では、ジョイスティックを用いた速度指令方式の場合の位置誤差は、並進動作で最大 0.8[cm]、回転動作で最大 0.7[cm]となった。一方、マスタアーム方式を用いた場合は、並進動作が 7.0[cm]、回転動作が 13.0[cm]となり、ジョイスティックを用いた速度指令方式による操作と比べて、微操作性が大きく低下していることが見て取れる。また、位置誤差のばらつきについても、ジョイスティックを用いた速度指令方式による操作では、ばらつきがほとんどないことが見て取れる。このことから、ジョイスティックを用いた速度指令方式による操作は、操作者の熟練度に依存せず、高い微操作性を実現することが可能であることが分かる。

3.2 スレーブアームの微操作性

次に、被験者の 1 人の作業について、 x 軸周りの回転動作を行った際の結果を、図 7、図 8 に示す。図 7(a)は、ジョイスティックを用いた速度指令方式で操作を行った際の手先の位置、図 7(b)は、そのときの手先の姿勢、図 8(a)は、マスタアーム方式を用いた操作を行った際の手先の位置、図 8(b)は、そのときの手先の姿勢を表している。目標動作は、手先を中心とし



(a) Position of the hand



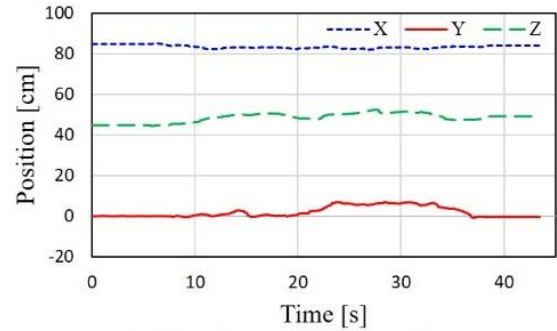
(b) Posture of the hand

Fig. 7 Transition of position/posture of the hand in case of joystick operation mode.

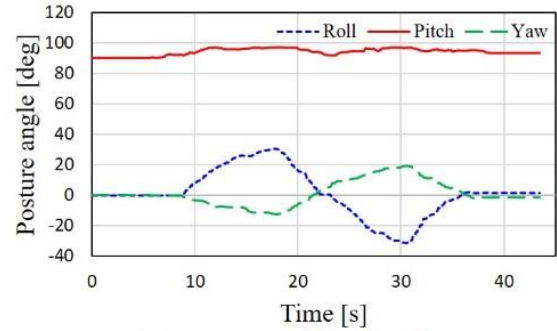
た x 軸周りの回転動作であるため、手先位置については、初期位置から動かないことが求められるが、図 8(a)を見ると、マスタースレーブ方式を用いた場合、手先位置に誤差が生じていることが見て取れる。一方、手先の姿勢については、Roll と書かれた x 軸周りの回転のみ、数値が変動することが期待されるが、図 8(b)を見ると、マスターアーム方式を用いた操作では、 z 軸周りの Yaw 角も一緒に動いていることが分かる。これは、マスターアームの各軸をすべて同時に操作することが困難であるためであると考えられる。一方、ジョイスティックによる速度指令方式を用いた場合は、所望の回転が実現されるようにスレーブアームの各関節角速度が算出されるため、図 7 より、手先位置ならびに、 y 軸周りの角度、 z 軸周りの角度を維持したまま、 x 軸周りの角度のみ動作させることができています。このことから、手先位置・姿勢の微操作を行う場合、ジョイスティックによる速度指令方式を用いた操作が適していることが確認できた。

4. 結言

本稿では、不整地移動マニピュレータの遠隔操作性向上を目的とし、速度指令方式であるジョイスティックコントローラを用いたスレーブアームの微操作を実現した。これにより、従来のマスターアームでは熟練を要する微操作が可能となった。次に、このシステムを利用して、三人の被験者に対する手先の並進・回転動作を実施し、ジョイスティックによる速度指令方式を用いたスレーブアーム操作の有用性の検証を行った。その結果、マスタースレーブ方式と比較し、ジョイスティックによる速度指令方式は、微操作性に優れていることが確認できた。今後は、マスタースレーブ方式と、ジョイスティックによる速度指令方式を組み合わせたピックアンドプレイス実験



(a) Position of the hand



(b) Posture of the hand

Fig. 8 Transition of position/posture of the hand in case of master-slave operation mode.

を行い、構築したシステムの有効性の検証をすすめる。また、移動体とマニピュレータの遠隔操作を連動させる、遠隔操作支援を構築していく予定である。

参考文献

- [1] 宮坂靖彦, 渡辺正秋, 田中貢, 他, "JPDR 解体実地試験の概要と成果", 原子力学会誌 Vol.38 No.7, p.553-576, 1996.
- [2] E. T. BAUMGARTNER, R. G. BONITZ, J. P. MELKO, L. R. SHIRAIISHI, P. C. LEGER, A. TRREBI-OLLENNU, "Mobile Manipulation for the Mars Exploration Rover", IEEE Robotics & Automation Magazine JUNE 2006, pp.27-36, 2006.
- [3] Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, "Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development International Conference on Advanced Mechatronics", 2010.
- [4] 桐林星河, 岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄次, "不整地移動マニピュレータの直感的遠隔操作が可能なベース姿勢同期機能を有するマスタースレーブシステム", 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2010.
- [5] 桐林星河, 永谷圭司, 岡田佳都, 吉田和哉, "三次元環境情報を基にした狭小空間での遠隔マニピュレーション支援システムの構築", ROBOMECH2012 講演論文集, DVD-ROM, 2012.